

# 動的環境における移動経路の計画に関する一考察

## A Discussion on Path Planning in Dynamic Environment

芦 田 昌 也

Masaya ASHIDA

### 1 はじめに

障害物がランダムに移動する環境において、あらかじめ定められた出発地から目的地に向かう移動経路を計画する方法について考察する。

既知の環境において、距離のように環境の構造に対し変化のない特徴を評価基準とする場合、適切な手法を用いて出発地から目的地までの最適経路を計画することは比較的容易である。<sup>[1]</sup> 未知の環境であっても、何度も試行を繰り返すことで、最終的に最適経路を発見することができる。これに対し、移動時間などのように状況によって変化する特徴を評価基準とする場合の経路計画では、<sup>[2]</sup> 最適経路を発見することは容易ではない。<sup>[3]</sup> さらに、障害物の移動などで構造自体に変化が生じる環境では、変化が生じる以前に計画された経路に沿って移動できるとは限らない。例えば、自分以外に誰もいない状況を想定して計画した移動経路は、周囲を移動する他人が現れることによって遮られることがある。現実の街路環境では、次々と他人が現れ移動するため、局所的には他人との衝突を避けるよう進路を修正し、大域的には目的地へ向かうよう随時経路を再計画する必要がある。

本稿は、障害物がランダムに移動する環境を構造変化が生じる環境とみなし、その環境下における経路計画のひとつの方法を提案し、その振る舞いについて検討するものである。具体的には、周囲の状況を見渡せる局所的な範囲内での障害物の移動状況の予測と、大域的な目的地から定められた一時的な目的地への距離とを考慮して、移動経路を計画する手法を提案する。前者の移動状況を予測した行動を回避行動、後者の一時的な目的地までの距離を考慮した行動を目的行動として環境内の移動体としてのエージェントに実装する。障害物の密度が異なる環境において、エージェントの行動指針となる回避行動と目的行動の重みを変化させ、その振る舞いをシミュレーションにより観測し、提案手法について検討を加える。

## 2 移動経路の計画

### 2.1 格子環境

対象となる環境は、図1のような二次元の正方格子状の環境とする。分割された各正方形領域をセルと呼ぶことにする。セルの位置は座標値  $(x,y)$  を用いて表す。障害物は複数個配置し、それぞれひとつのセルを占有する。各障害物の初期位置は乱数で定め、いずれもある一定時間に隣接するセルのひとつに移動する。移動方向は、障害物ごとに移動のたびに乱数によって決定する。

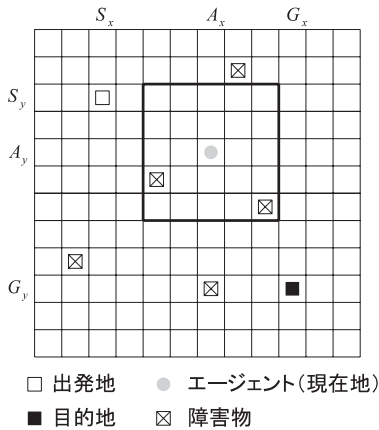
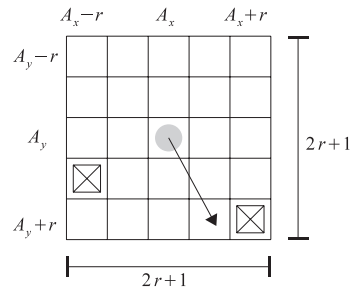


図1 格子環境の例



(図1の太線で囲まれた領域に対応)

図2 近傍領域の例

### 2.2 エージェント

環境中で出発地から目的地へ移動する主体をエージェントと呼ぶことにする。エージェントはひとつのセルを占有し、ある一定時間に隣接するセルのひとつに移動する。出発地  $S = (S_x, S_y)$ 、目的地  $G = (G_x, G_y)$  およびエージェントの現在地  $A = (A_x, A_y)$  は既知である。また、エージェントは、現在地の周囲の状況について、一定範囲の正方領域（以下、近傍領域） $R = \{(x,y) | A_x - r \leq x \leq A_x + r, A_y - r \leq y \leq A_y + r, r \text{ は正の整数}\}$  をエージェント自身の真上から俯瞰し、障害物の位置を認識できるものとする（図2）。

### 2.3 計画手法

出発地から目的地までのような広範囲で経路を計画しても、障害物の位置は変化するため、実際には途中の地点で当初の計画が有効でないことがある。現在地から目的地に向かう大まかな経路を定めつつ、現在地の周囲の障害物の移動を予測し、局所的な経路計画を繰り返す。

0	1	2	3	2
1	2	3	4	3
2	3	4	5	4
⊗	4	5	6	5
4	5	6	7	⊗

図3  $\alpha = 0$  の場合

3	4	5	5	4
2	3	4	4	3
1	2	3	3	2
⊗	1	2	2	1
1	2	2	1	⊗

図4  $\alpha = 1$  の場合

1.5	2.5	3.5	4	3
1.5	2.5	3.5	4	3
1.5	2.5	3.5	4	3
⊗	2.5	3.5	4	3
2.5	3.5	4	4	⊗

図5  $\alpha = 1/2$  の場合

### 2.3.1 副目的地の設定

現在地から目的地までの大まかな経路を定めるために、近傍領域に副目的地を設定する。副目的地は、現在地と目的地を結ぶ線分と、近傍領域の境界線となるセルとが交差する位置に設定する。図2では、エージェントの位置から矢印方向に目的地があり、副目的地は矢印で示されたセルに設定される。

副目的地のセル  $t = (t_x, t_y)$  と近傍領域内の各セル  $p_i = (x_i, y_i)$  との距離  $l(p_i, t)$  を次式で定義する。

$$l(p_i, t) = |t_x - p_x| + |t_y - p_y| \quad (1)$$

$l(p_i, t)$  の最大値が  $L$  であるとき、近傍領域内の各セルに対して、副目的地に近い位置にあるセルが、遠い位置にあるセルより大きな値となる評価値  $h(p_i)$  を次式で算出して割り当てる。

$$h(p_i) = L - l(p_i, t) \quad (2)$$

### 2.3.2 障害物の移動予測

障害物は単位時間に隣接セルのひとつに移動するものとする。障害物の移動先となるセルはランダムに選択される。 $t$  時間後に障害物が存在する可能性のあるセルの範囲は、障害物の現時点の位置を母点とした距離  $t$  までのボロノイ領域に対応する。ボロノイ線上のセルは、どの障害物からも最も離れた位置に対応する。

障害物  $B_i$  のボロノイ領域について、 $p_i$  の距離を  $b_i(p_i)$  とする。近傍領域内の全障害物のボロノイ領域からの距離  $g(p_i)$  を次のように割り当てる。

$$g(p_i) = \min \{ b_1(p_i), b_2(p_i), \dots, b_n(p_i) \} \quad (3)$$

### 2.3.3 移動可能セルの評価

目的行動を重視する場合には、 $h(p_i)$  の値により移動可能なセルを決定する。これにより、副目的地への最短距離での移動を繰り返しながら、目的地へ到達することになる。この場合、障害物との衝突回避は考慮されない。

回避行動を重視する場合には、 $g(p)$  の値により移動可能なセルを決定する。隣接するどのセルにも次の時刻で障害物に占有される可能性がある場合を除いて、衝突を回避する行動が可能である。この場合は、副目的地への到達を保証することはできない。

両者の評価を考慮する度合いを  $0 \leq \alpha \leq 1$  とし、次の式で近傍領域の各セルを評価する。

$$f(p) = \alpha g(p) + (1 - \alpha) h(p) \quad (4)$$

たとえば、 $\alpha = 0$  の場合は、目的行動を重視したセルの選択となり、 $\alpha = 1$  の場合は、回避行動を重視したセルの選択となる。また、 $\alpha = 1/2$  の場合は、目的行動と回避行動とを同程度に重視したセルの選択となる。図 3・4・5 に、それぞれの場合の評価とそれに基づく経路計画の例を示す。

```

1 : list ← S[Sx, Sy]
2 : while list ≠ ∅ do
3 :   p[i, j] ← pop(list)
4 :   A[x, y] ← move(p[i, j])
5 :   if A[x, y] = G[Gs, Gd] then
6 :     return true
7 :   end if
8 :   if free(x, y, r) = true and list ≠ ∅ then
9 :     continue
10 :   end if
11 :   for j = y - r to y + r do
12 :     for i = x - r to x + r do
13 :       f[i, j] ← α g(p[i, j]) + (1 - α) h(p[i, j])
14 :     end for
15 :   end for
16 :   u ← x, v ← y
17 :   for k = 1 to r do
18 :     pk[i, j] ← arg max {f[u + 1, v], f[u, v - 1], f[u - 1, v], f[u, v + 1]}
19 :     append(pk[i, j], list)
20 :     u ← i, v ← j
21 :   end for
22 : end while

```

図 6 経路計画の手続き

## 2.4 経路計画の手続き

経路計画の手続きを図6に示す。*list*は計画された経路上のセル列を記録するリスト構造である。 $\text{pop}(list)$ は、*list*の先頭セルを返す副手続きであり、 $\text{append}(p, list)$ は、セル*p*を*list*に追加する副手続きである。また、 $\text{move}(p)$ は、エージェントを*p*に移動した上で、その位置を返す副手続きであり、 $\text{free}(x, y, r)$ は、エージェントの移動によって新たに近傍領域に含まれる部分がすべて自由空間である場合（新たな障害物が存在していない場合）にtrueを返す副手続きである。

この手続きによる処理内容はおおよそ次のようになる。括弧内の数字は図6の該当箇所の行番号である。出発地のセルを*list*に追加し（1:），以後、*list*が空になるまでエージェントは移動と経路計画を繰り返す（2:-22:）。*list*の先頭セルにエージェントを移動し（3:-4:），そのセルが目的地であるかどうか判定する。目的地であれば終了する（5:-7:）。目的地でない場合には、移動後に新たに近傍領域となる部分が自由空間であり、かつ、*list*も空でない場合（直前の経路計画が残っている場合）には、移動を継続する（8:-10:）。移動したセルが目的地でもなく、自由空間でもない場合や直前の計画をすべて実行済みである場合には、あらたに経路を計画する。近傍領域のすべてのセルを評価する（11:-15:）。現在位置を仮の中心として記録し（16:），その周囲4方向にあるセルの中から評価値最大となるセルを*list*に追加する（18:-19:）。追加したセルで仮の中心を更新し（20:），再び周囲4方向から評価値最大となるセルを探し出して*list*に追加することを繰り返す（17:-21:）。

## 3 シミュレーション

目的行動を重視することで、障害物との衝突がどの程度生じるのか、または、回避行動を重視することで、目的地へ到達するまでのステップ数がどの程度変化するのか、といった特性をシミュレーションにより検討する。

### 3.1 シミュレーションの実行環境

シミュレーションの実行にかかわる各種パラメータは、表1のとおりとする。

格子環境は、 $(100, y) = (0, y)$  および  $(-1, y) = (99, y)$ ，ならびに  $(x, 100) = (x, 0)$  および  $(x, -1) = (x, 99)$  となるよう上下左右の端部をそれぞれ接続して、トーラス状の環境とする。これにより、エージェントと障害物が格子環境の外に移動しないようにする。障害物の個数  $N$  を1000個から5000個まで500個ずつ増加させた、9種類の格子環境  $E(N) = \{E_{1000}, E_{1500}, \dots, E_{5000}\}$  のそれぞれについて、障害物の初期配置を乱数により決定した1000例を対象とする。すべての例において、エージェントの行動指針の重み  $\alpha$  の値を0から1まで0.1ずつ変化させた11通り  $W(\alpha) = \{W_0, W_{0.1}, \dots, W_{1.0}\}$  について、シミュレーションを実行する。シミュレーションでは、エージェントが目的位置に到着するまでに要したステップ数と、そ

の間の障害物との衝突回数を記録する。

表 1 シミュレーションの実行環境

設 定 項 目	設 定 値
格子環境の大きさ	100 セル×100 セル
近傍領域の大きさ	11 セル×11 セル ( $r=5$ )
エージェントの移動速度	単位時間に 1 セル
障害物の移動速度	単位時間に 1 セル
出発地の位置	$(S_x, S_y) = (30, 30)$
目的地の位置	$(G_x, G_y) = (70, 70)$

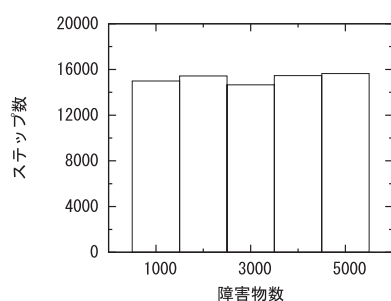


図 7 回避行動のみの場合のステップ数

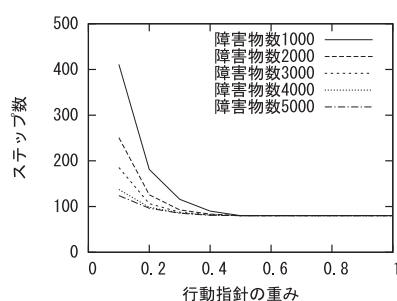


図 8 行動指針の重みの変更によるステップ数の変化

### 3.2 シミュレーションの結果

$(E(N), W(\alpha))$  のひとつの組み合わせについて、1000 例のステップ数の平均値、ならびに障害物との衝突回数の平均値を算出した結果を、表 2 と表 3 にそれぞれ示す。

#### 3.2.1 ステップ数

$(E(N), W(0))$  の  $N$  に対するステップ数の変化を図 7 に示す。また、 $(E(N), W(\alpha))$  のうち、 $\alpha = 0$  の場合を除いたすべての組み合わせについて、 $\alpha$  の変更に対する  $E(N)$  別のステップ数の変化を図 8 に示す。

$\alpha = 0$ ，すなわち、目的行動を全く重視しない場合に、障害物の個数に関わらず、ほぼ一定のステップ数で目的地に到達する。目的行動を重視するにつれて、目的地までのステップ数は減少し、 $\alpha = 0.5$  で目的地までの最小ステップ数である 80 に収束する。行動指針の重みが同じであれば、障害物個数が増加するにつれて、目的地までのステップ数は減少する。

表2 目的地までのステップ数

$N \backslash \alpha$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1000	14990	410	181	115	90	80	80	80	80	80	80
1500	15040	298	144	99	85	80	80	80	80	80	80
2000	15427	250	125	92	83	80	80	80	80	80	80
2500	15288	223	113	89	82	80	80	80	80	80	80
3000	14657	185	106	87	81	80	80	80	80	80	80
3500	14612	155	102	87	81	80	80	80	80	80	80
4000	15457	137	98	86	81	80	80	80	80	80	80
4500	15166	127	97	85	81	80	80	80	80	80	80
5000	15642	123	96	85	80	80	80	80	80	80	80

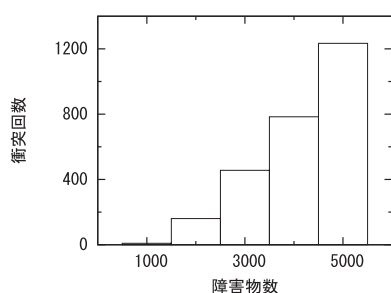


図9 回避行動のみの場合の衝突回数

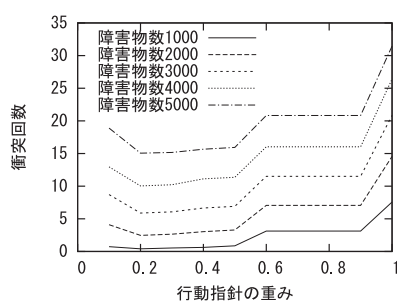


図10 行動指針の重みの変更による衝突回数の変化

## 3.2.2 衝突回数

$(E(N), W(0))$  の  $N$  に対する衝突回数の変化を図9に示す。また、 $(E(N), W(\alpha))$  のうち、 $\alpha = 0$  の場合を除いたすべての組み合わせについて、 $\alpha$  の変更に対する  $E(N)$  別の衝突回数の変化を図10に示す。

$\alpha = 0$ , すなわち、回避行動のみの場合でも衝突は不可避であり、障害物の個数の増加に伴い、衝突回数が増加する。 $\alpha$  の値が大きくなるにつれて、衝突回数は一旦減少したのち再び

表3 目的地に到達するまでの衝突回数

$N \backslash \alpha$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1000	9	1	0	1	1	1	3	3	3	3	8
1500	52	2	1	1	2	2	5	5	5	5	11
2000	160	4	2	3	3	3	7	7	7	7	15
2500	312	7	4	4	5	5	9	9	9	9	18
3000	456	9	6	6	7	7	12	12	12	12	21
3500	597	11	8	8	9	9	14	14	14	14	24
4000	784	13	10	10	11	11	16	16	16	16	26
4500	953	16	13	13	13	13	18	18	18	18	29
5000	1234	19	15	15	16	16	21	21	21	21	31

増加する。 $\alpha = 0.2$ , または  $\alpha = 0.3$  であるときに, どの環境においても衝突回数は最小である。

### 3.3 検討

目的地に到達するまでのステップ数と, その間の障害物との衝突回数を重ね合わせて検討する。 $\alpha = 0$  は, 回避行動を最も重視した経路計画であるが, シミュレーションの結果からは衝突回数は 0 ではない。その一方で  $\alpha = 0.2$  で衝突回数は極小となることや, 目的行動を最も重視した経路計画である  $\alpha = 1$  の場合の衝突回数も  $\alpha = 0$  の場合より少ない。また, ステップ数は最小値より 10 回程度, 衝突回数は極小値より 1 回程度の増分を許容することにより, 目的行動と回避行動のそれぞれの目標を満たした振る舞いが見られる。これらのことから, 本手法について今回のシミュレーションからは次の知見が得られたものと考えられる。

- 回避行動のみでは完全な障害物回避は保証できない
- 目的行動が障害物回避の効果をもたらす
- 適切な重みにより目的行動と回避行動の両者の均衡を保つ経路計画が可能である

今回のシミュレーションにおいては,  $0.5 \leq \alpha \leq 0.9$  の範囲で, ステップ数, 衝突回数ともに変化が見られない。これはセルの評価方法に依存していると考えられる。目的行動のための評価では, 近傍領域の境界部分に副目的地が必ず 1 つ設定される。近傍領域を  $2r + 1$  セル  $\times$   $2r + 1$  セルとすると, 近傍領域内の各セルに割り当てられる評価の最大値は  $4r$  である。回避行動のための評価では, 近傍領域の四隅のひとつに障害物が存在するときのみ評価の最大値が  $4r$  である。それ以外の場所に障害物が存在する場合や複数存在する場合には, この最大値をとるセルはない。そのため, 目的行動の評価が支配的になっているものと考えられる。

## 4 おわりに

障害物がランダム移動する環境において, 局所的な範囲内での障害物の移動状況の予測と, 大域的な目的地から定めた副目的地の目的地への距離とを考慮した経路計画に基づいて移動するエージェントの振る舞いについて検討した。

提案手法に基づく経路計画によるシミュレーションからは, 提案手法の回避行動だけでは, 完全な障害物回避は保証されないが, ある程度の目的行動が障害物回避の効果をもたらしめているような振る舞いと, 目的行動と回避行動の適切な重みづけにより, 可能な限り障害物を回避しつつ目的地を目指す振る舞いとが確認された。また, 目的行動のための評価と回避行動のための評価における評価値の算出方法の再検討の必要性が示唆された。

回避行動のみの場合でも, 障害物数にかかわらず, ほぼ一定ステップ数で目的地に到達す



る現象の説明は今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] Stuart Russel, Peter Norvig: Artificial Intelligence A Modern Approach 2nd-edition, Prentice Hall (2002)
- [2] Richard E. Korf: Real-time heuristic search, Artificial Intelligence, Vol. 42, No 2-3, pp. 189-211 (1990)
- [3] 安場 直史, 長岡 諒, 矢野 純史, 香川 浩司, 森田 哲郎, 沼尾 正行, 栗原 聡: ナビゲーションシステムにおける熟考性と即応性を兼ね備えたルート探索手法, 第22回人工知能学会全国大会, 1D1-4 (2008)
- [4] Carlos Hernandez, Pedro Meseguer:  $LRTA^*(k)$ , Proc 19th IJCAI-05, pp.1238-1243 (2005)
- [5] Carlos Hernandez, Pedro Meseguer: Improving  $LRTA^*(k)$ , Proc.20th IJCAI-07, pp.2312-2317 (2007)